平整冰和碎冰区单桩锥体风电基础结构冰载荷离散元分析

王祥,刘璐,杨海天,季顺迎

(大连理工大学,116024 大连)

摘　要:在渤海和北黄海海域,冰载荷是影响风电基础结构振动响应及疲劳寿命的关键因素。对于单桩风电柔性结构而言,在水线处安装抗冰锥可有效降低冰载荷,保障海上风电安全运行。为分析海冰对锥体风电结构的冰载荷,基于扩展多面体离散元方法模拟了平整冰和碎冰对锥体风电结构的作用过程,分析了不同锥径和海冰密集度下的锥体风电结构冰载荷及冰激结构振动响应。计算结果表明,锥体结构冰载荷具有显著的随机性和周期性,平整冰对锥体结构冰载荷要明显高于碎冰;平整冰对上锥体的冰载荷大于下锥体冰载荷,而碎冰对上锥的冰载荷却小于下锥体冰载荷;所提方法可有效模拟海冰对锥体风电结构的作用力。

关键词:离散元方法;冰载荷;锥体风电结构;平整冰;碎冰区

中图分类号:P751;P731.15　　**文献标志码**:A

Discrete element analysis of ice loads on conical monopile structure of wind turbine in level ice and broken ice field

WANG Xiang,LIU Lu,YANG Haitian,JI Shunying

(Dalian University of Technology,116024 Dalian,China)

Abstract:The ice load is a key factor affecting the vibration response and fatigue life of wind turbine structure in the Bohai Sea and the North Huanghai Sea of China. For the flexible monopile of wind turbine,the anti-ice cones installed on the structure at the water level can effectively reduce the ice load, which can ensure safe operation. To analyze the ice load of conical pile of wind turbine,the dilated polyhedron based discrete element method (DPDEM) is adopted to model the level ice and broken ice floes. The ice loads and ice-induced vibration of conical structure are simulated with various conical diameters and ice concentrations of broken ice field. The simulated results show that the ice loads of level ice and broken ice perform the characteristics of randomness and periodicity. The ice load of level ice is obvious higher than that of ice floes. The ice load of level ice on the upward cone is larger than that on the down-

收稿日期:2020-08-31　　**修回日期**:2021-10-22

基金项目:国家重点研发计划重点专项(No.2017YFE0111400;2016YFC1401505);国家自然科学基金项目(No.51639004;41576179)

通信作者:季顺迎,教授。E-mail:jisy@dlut.edu.cn

引用格式:王祥,刘璐,杨海天,等.平整冰和碎冰区单桩锥体风电基础结构冰载荷的离散元分析[J].应用力学学报,2022,39(1):44-53.

WANG Xiang,LIU Lu,YANG Haitian,et al. Discrete element analysis of ice loads on conical monopile structure of wind turbine in level ice and broken ice field[J]. Chinese journal of applied mechanics,2022,39(1):44-53.

ward cone, while the ice load of broken ice on the upward cone is smaller than that on the downward cone. The study shows that the DPDEM can be applied to simulate the ice load on conical structure of wind turbine effectively. It can be applied to the ice-resistant structure design and safe operation of offshore conical structures in ice-covered regions.

Key words: discrete element method; ice load; conical structure of wind turbine foundation; level ice; broken ice field

随着可再生能源的迅速发展,风力发电已成为其不可或缺的重要组成部分。相较于陆地风力发电,海上风能因储备资源更为丰富、平均空气密度高且不占用土地资源等优点而具有广阔发展前景[1]。在渤海及北黄海,冬春季节受西伯利亚强冷空气影响,使得风能密度远高于其他海域。因此,寒区风力发电成为我国未来发展海上风电的重点[2]。在高纬度寒冷海域,海冰不可避免地与风电基础结构发生相互作用,产生强烈的冰载荷和结构动力响应[3]。单桩风机结构作为一种柔性细长结构,相较于海上石油平台等传统海洋工程结构,其在海冰作用下的动态响应更为复杂[4-5]。在随机振动下,风机结构的冰载荷及动力响应对冰厚和海冰强度较为敏感,严重影响风机结构的疲劳寿命与运行安全[6]。2007年,Huang 等[7]通过室内冰池实验开展了不同冰速下的单桩结构冰激振动研究。

寒冷海域的风电基础结构需要具备良好的抗冰性能。由于海冰的压缩强度远大于其弯曲强度,锥体结构能有效将海冰挤压破坏转化为弯曲破坏,从而降低结构冰载荷和冰激结构振动[8]。风机结构的冰载荷不仅与冰厚、冰强度、冰速有关,同样与海冰分布类型、锥径等参数密切相关。龙雪等[9]通过球体离散元模拟发现下锥结构可有效降低海洋平台的冰载荷。2013 年,Tian 等[10]通过室内模型试验发现,当锥径与平整冰厚之比小于 30 时,其冰载荷随锥径的增大而增大。而有关平整冰与碎冰区对风电锥体结构冰载荷相互作用的比较研究较少。

离散单元法[9-16]广泛应用于岩土工程、化工工程和海洋工程领域,特别是在寒区海洋工程方面。离散元方法因其能够有效描述海冰破碎运动过程中的动冰载荷而被广泛应用,并发展了球体[9]、圆盘[11]、多面体[12]和扩展多面体[13]等不同单元类型。基于球体单元的黏结-破碎模型具有模型简单、计算效率高等优点,可模拟海冰与海洋工程结构的相互作用与破碎过程[9,14];基于多面体模型离散元方法可有效描述平整冰对海洋工程结构相互作用动力过程中的弯曲破坏、堆积重叠现象[12];基于扩展多面体模型的离散元方法能够很好地描述海冰与海洋工程结构相互作用的动力过程,并且可提高多面体单元与海洋结构作用的计算效率,在海冰离散元领域具有明显优势[13,15]。

本文采用扩展多面体离散元方法分别构造平整冰及碎冰区,模拟海冰与锥体风电基础结构的相互作用过程,并将计算冰载荷结果与 IEC 规范和 ISO 标准进行对比,以验证其可靠性,进而研究平整冰及碎冰对锥体风电基础结构的振动响应及冰载荷变化规律。

1 扩展多面体离散元方法

采用扩展多面体离散元方法可以有效模拟海冰的几何形态,并通过单元间的黏结-破碎模型描述海冰与单桩锥体风电基础结构的破坏过程,由此确定不同冰况和结构参数影响下的冰载荷。

1.1 海冰扩展多面体离散元方法

若任意给出空间中的两个几何体点集 A 和 B,那么空间集合 A 和 B 的 Minkowski Sum 定义为[17-18]

$$A \oplus B = \{x + y \mid x \subset A, y \subset B\} \tag{1}$$

式中,x 和 y 分别为集合 A 和 B 中的几何坐标点。

空间体 A 和 B 分别定义为基本多面体与扩展球体,基本多面体与球体单元经过 Minkowski Sum 叠加,形成一个具有光滑度的扩展多面体,如图 1 所示,扩展球体半径称为扩展半径。采用 Voronoi 切割算法将一定区域的二维平面随机划分为若干任意多面形,其形状与随机点分布位置密切相关[19]。将任意多面形在垂直方向上拉伸并基于 Minkowski Sum 方法构造具有一定厚度的扩展多面体海冰单元[13]。由此生成的平整冰初始场如图 2(a)所示。对于碎冰区初始场,可通过改变海冰覆盖面积与海域总面积之比即海冰密集度,生成具有随机形态和面积分布的碎冰区,如图 2(b)所示。

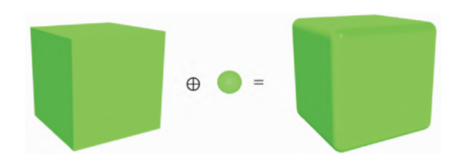
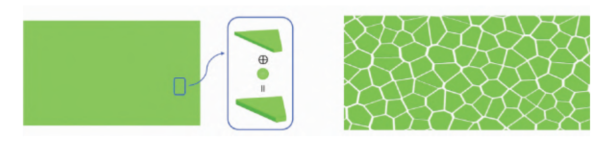


图 1　基于 Minkowski Sum 的扩展多面体

Fig. 1　Dilated polyhedral element based on Minkowski Sum



(a)平整冰初始分布　　(b)碎冰区初始分布

图 2　基于扩展多面体离散元的海冰初始分布

Fig. 2　Initial distributions of level ice and broken ice field constructed with the dilated polyhedral discrete elements

在扩展多面体离散元的接触求解过程中，可采用基于近似包络函数的搜索判断算法计算接触点与重叠量，并采用非线性的接触力模型简化计算扩展多面体间的接触力以提高计算效率。法向接触力可表示为法向弹性力和法向黏滞力之和[20]，即

$$F_n = F_n^e + F_n^v = k_n \delta_n^{1.5} \delta^{1.5} + c_n \sqrt{\delta_n} \dot{\delta}_n \qquad (2)$$

其中

$$k_n = \frac{4E^* \sqrt{R^*}}{3}, c_n = \zeta_n \sqrt{m_{AB} k_n},$$

$$\zeta_n = \frac{-\ln e}{\sqrt{\pi^2 + \ln^2 e}}$$

式中：k_n 为法向接触刚度；δ_n 为两个多面体单元间的法向重叠量；c_n 为法向阻尼系数；$\dot{\delta}_n$ 为法向相对速度；E^* 和 R^* 分别为等效弹性模量和等效颗粒半径[21]；ζ_n 为量纲为一的阻尼系数；m_{AB} 为等效质量；e 为单元的回弹系数[22]。

切向接触力与切向重叠量和摩擦力有关，一般最大切向力不超过摩擦力。切向接触力 F_t 可表示为[20]

$$F_t = F_t^e + F_t^v = \mu |F_n^e| \left[1 - \left(1 - \frac{\delta_t}{\delta_t^{\max}}\right)^{1.5}\right] + c_t \sqrt{\frac{6\mu m_{AB} |F_n^e| \sqrt{1 - \delta_t/\delta_t^{\max}}}{\delta_t^{\max}}} \dot{\delta}_t \qquad (3)$$

式中：F_t^e 为切向弹性力；F_t^v 为切向黏滞力；μ 为摩擦系数；δ_t 为切向重叠量，一般根据相对切向速度并逐步叠加的方法累计计算切向重叠量；$\delta_t^{\max}$ 为最大切向重叠量，其主要由摩擦系数和法向重叠量决定，且 $\delta_t^{\max} = \mu[\delta_n(2-\nu)]/(2-2\nu)$，这里 ν 为泊松比；$\dot{\delta}_t$ 为切向相对速度；c_t 为切向阻尼系数，这里取 $c_t = c_n/[2(1+\nu)]$。

对于单元间的黏结模型，在两个相互黏结单元间的交界面角点位置处设定积分点。该积分点在两单元上对应的角点称为黏结节点，且该交界面为称为黏结面，如图 3 所示。通过设定单元的刚度与阻尼即可计算黏接节点上的法向应变与切向应变。采用三维条件下的弹性矩阵，黏结单元间的弹性应力 $\boldsymbol{\sigma}^e$ 写作[13]

$$\boldsymbol{\sigma}^e = \begin{bmatrix} k_n & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon} \qquad (4)$$

其中：E 为弹性模量；$\boldsymbol{\sigma}^e$ 为考虑法向和切向的应力，即 $\boldsymbol{\sigma}^e = [\sigma, \tau]^{\mathrm{T}}$；$\boldsymbol{\varepsilon}$ 为考虑黏结节点之间的法向和切向应变，即 $\boldsymbol{\varepsilon} = \{\varepsilon_n, \varepsilon_t\}^{\mathrm{T}}$。在扩展多面体单元的黏结面上，法向阻尼系数 c_n 与切向阻尼系数 c_t 表示黏滞作用。由黏滞作用产生的应力 $\boldsymbol{\sigma}^v$ 和两个黏结节点间的黏结力 $\boldsymbol{F}^b$ 分别写作[13]

$$\boldsymbol{\sigma}^v = \begin{bmatrix} C_n & 0 \\ 0 & C_s \end{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \beta \begin{bmatrix} k_n & 0 \\ 0 & k_s \end{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} \qquad (5)$$

$$\boldsymbol{F}^{\mathrm{b}} = (\boldsymbol{\sigma}^e + \boldsymbol{\sigma}^v) \cdot \frac{A}{n} \qquad (6)$$

式中：$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}$ 为应变率，且 $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \{\dot{\varepsilon}_n, \dot{\varepsilon}_t\}^{\mathrm{T}}$；$A$ 为交界面面积；n 为交界面上的黏结节点个数。

将求得的单元间黏结力转移到单元质心上，并考虑流体拖曳力、浮力等其他作用力，即可确定各离散单元质心的合力。

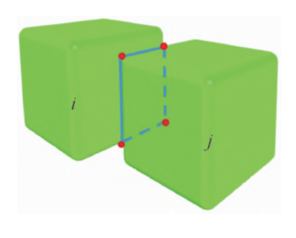


图 3　扩展多面体单元间的黏结面模型

Fig. 3　The bonding surface between dilated polyhedral elements

针对扩展多面体单元间的黏结-破碎模型，本文在法向拉伸应力与切向剪切应力共同作用下计算临界应力。如图 4 所示，这里损伤(D_e)是指加载过程中刚度软化的过程，即刚度由 k 变为 $k(1\text{-}D_e)$ 的过程，混合断裂能是指在拉伸和剪切两个方向综合影响下的断裂能 G^c。当超出临界应力后，采用损伤度来描述材料刚度软化的过程[23]，并通过 B-K 混合断

裂能模型计算单元间的临界变形[24-25]。当节点间的变形大于其临界变形时,则该单元间的黏结失效,黏结单元发生分离。

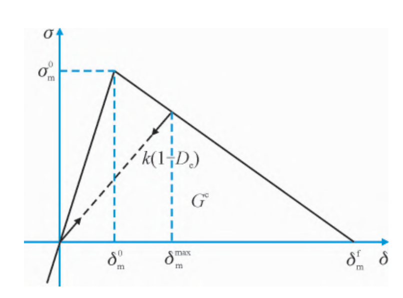


图 4　单元间黏结失效的应力和变形关系

Fig. 4　The stress and deformation relationship of bond failure between elements

1.2　单桩锥体风电基础结构的计算模型

这里选取渤海某单桩锥体风电基础结构作为研究对象建立相应的离散元模型,如图 5(a)所示。本文仅考虑海冰对锥体结构的冰载荷,尚未考虑风载荷。这里将风电上下锥体交界面处水位高度记为 0 水位,取抗冰锥形心作为基础结构振动位移起始点。单桩风机的主要结构参数为:风机轮毂距水面高度 90 m;距海面高度 12 m 以上部分为薄壁圆锥筒形结构;风电抗冰锥位置处为薄壁圆筒结构,直径 5.5 m。风电锥体结构包括上锥、下锥和抗冰锥套筒结构,将风电锥体结构表面划分为三角形单元,用于扩展多面体海冰单元与锥体结构间的接触判断。风电基础结构的主要参数为:最大锥径 $D_{max}=8.75$ m;最小锥径 $D_{min}=5.5$ m;锥体角度 $a=64.9°$;锥体高度 $h=3.25$ m;结构运动刚度 $k=2.42$ MN/m;结构运动阻尼 $c=1.67\times10^5$;结构基频 $f=0.2826$ Hz;风电结构总质量 $m=7.68\times10^5$ kg。

为分析单桩锥体风电基础结构的冰激振动响应,将基础结构视为可做刚体运动的质量块,同时简化海冰与结构相互作用处的结构刚度和阻尼,将结构的运动视为质量块在刚度和阻尼影响下的刚体往复运动,因此可将该运动系统视为“质量-刚度-阻尼模型”,如图 5(b)所示,其动力学方程可表示为

$$F_{ice}=m\ddot{u}_t+c\dot{u}_t+ku_t \tag{7}$$

式中:F_{ice}为冰载荷;m 为结构质量;u_t 为结构位移;c 为结构平动阻尼;k 为结构平动刚度。其中,阻尼矩阵取为 Rayleigh 阻尼形式,即 $c=\alpha m+\beta k$,参数 α 和 β 通过结构的模态阻尼比和固有频率计算,即 $\alpha=0.1711$,$\beta=0.0146$。

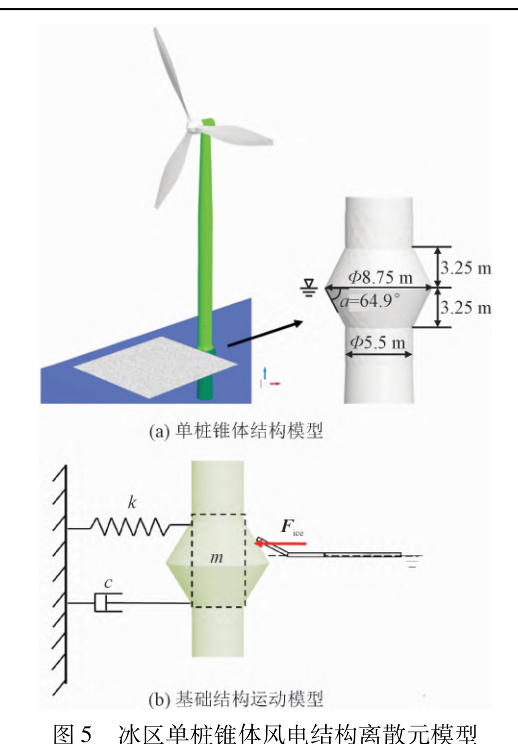


图 5　冰区单桩锥体风电结构离散元模型

Fig. 5　The discrete element model of wind turbine structure with conical mono-pile in ice field

2　平整冰区锥体风电结构冰载荷的离散元模拟及主要影响因素分析

考虑潮汐涨落过程中,平整冰对锥体结构作用位置的差异。采用离散元方法对上下锥结构冰载荷及冰振响应进行数值计算和对比分析,并在此基础上考虑水位升降所对应的作用锥径情况,讨论分析上下锥体锥径影响下的冰载荷变化规律。

2.1　平整冰对锥体风电结构冰载荷的离散元模拟

锥体风电结构的冰载荷与海冰厚度、速度等海冰参数密切相关。这里结合风机所在海域的海冰环境条件,取海冰厚度 $h_i=0.15$ m,冰速 $v_i=0.5$ m/s,开展海冰对锥体结构作用的离散元模拟计算。其主要参数包括水位高度 $H=0.65$ m、作用锥径 $D=8.1$ m,并参考了扩展多面体离散元模拟的相关文献[26],主要离散元模拟参数为:冰厚 $h_i=0.15$ m;海水流速 $v_w=0.5$ m/s;海水密度 $\rho_w=1\,035$ kg/m³;海冰弹性模量 $E=1.0$ GPa;海冰摩擦系数 $\mu=0.2$;海冰回弹系数 $e=0.3$;海冰泊松比 $\nu=0.3$;法向黏结强度$\sigma_n=0.6$ MPa;海冰单元平均尺寸 $S_i=0.3$ m²;海冰计算域 $l\times w=46$ m × 42 m;拖曳力系数 $C_{dF}=0.6$;拖曳力矩系数 $C_{dM}=0.03$。

图 6 给出了平整冰与锥体结构相互作用的破碎过程。从中可以发现,平整冰呈现初次断裂、爬升、二次断裂和清除的过程,由此引起锥体结构的交变动冰载荷。图 7 为单桩风电结构冰载荷时程曲线,呈现出很强的随机性与周期脉冲特性。本文参考了文献[27-28]中的"峰值"提取方法,该方法可从冰力时程曲线中有效提取"峰值",在现场监测和数值模拟的结果分析中效果较好。通过对结构冰载荷时程的峰值进行提取,得到冰载荷峰值的平均值为 83.77 kN。

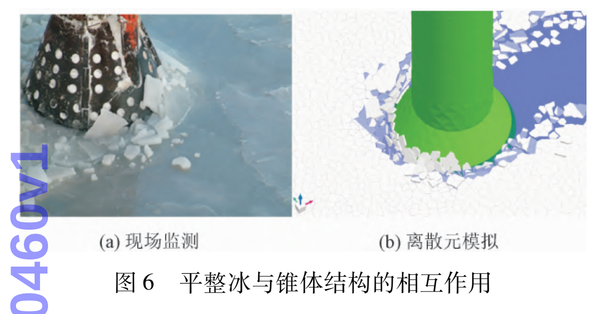


图 6 平整冰与锥体结构的相互作用

Fig. 6 Interaction between level ice and conical structure

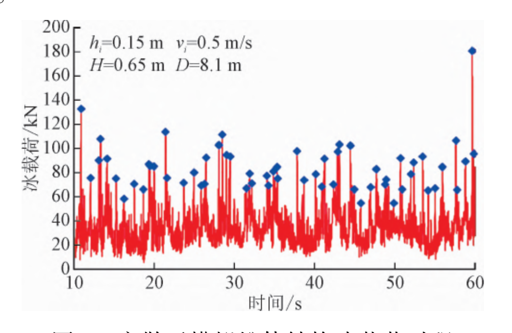


图 7 离散元模拟锥体结构冰载荷时程

Fig. 7 Time series of ice load on conical structure simulated with DEM

为验证该离散元计算结果的合理性,这里选取平整冰与上锥风电基础结构 4 个不同作用部位的冰载荷峰值的均值与 IEC 61400-3 规范[29] 和 ISO 19906 标准[30]进行对比,对比结果如图 8 所示。从中可以发现,离散元模拟冰载荷峰值和 IEC 规范及 ISO 19906 标准计算冰力均随锥径的增加而线性增大,但离散元结果要低于两个规范值,其中 ISO 19906 标准计算的冰载荷最大。这是由于 ISO 标准和 IEC 规范的依据主要是理论模型分析,理论模型一般不考虑动态过程,只考虑海冰断裂瞬间的静态冰力;也不考虑圆锥形状,只考虑二维的斜坡结构。因此理论模型对冰力的计算一般较大。此外,考虑到 IEC 规范及 ISO 19906 标准相对比较保守,以保障结构抗冰设计的安全性。

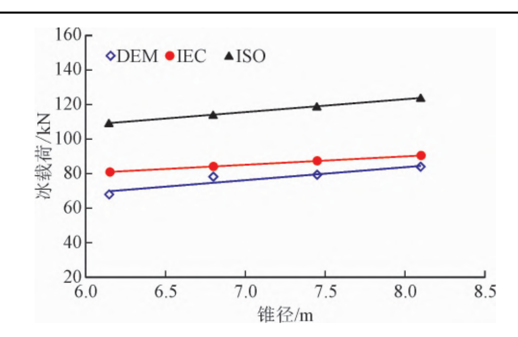


图 8 离散元计算冰载荷与 ISO 标准、IEC 规范对比

Fig. 8 Comparison of ice loads of DEM results with ISO standard and IEC code

2.2 潮汐涨落影响下平整冰对锥体结构冰载荷的影响

受潮汐涨落影响,海冰将作用于上下不同锥面。为分析平整冰与上锥、下锥作用下破坏模式和冰载荷的差别,分别选取水位高度 H 为 0.65 m 和 −0.65 m,海冰作用上下锥径均为 D = 8.1 m。图 9 给出了平整冰对风电上锥和下锥结构相互作用的离散元模拟过程,计算得到冰载荷时程曲线如图 10 所示。其中,上锥体冰载荷峰值均值为 F_{up} = 83.5 kN,下锥体冰载荷峰值的均值为 F_{down} = 79.1 kN。不难发现,不论是上锥体还是下锥体,其冰载荷均具有很强的随机性和周期脉冲特点。冰载荷的随机性是由海冰作用于锥体结构上时发生的随机断裂造成的,其周期性与冰速、冰厚和海冰强度影响下的断裂长度密不可分。对于平整冰作用于上下锥时冰载荷的差别,龙雪等[9]从冰排断裂时的受力特点进行了详细的讨论。这主要是由于海冰与上锥体作用时会发生明显的弯曲破碎,破碎后的冰块在后续冰排推动下不断爬升堆积于上锥面,后受重力影响落入水中被清除的周期性加载与卸载过程;而作用于下锥体的海冰受锥体结构阻碍而不断下潜,在浮力与拖曳力影响下,碎冰块对锥体结构的作用力被大大削弱,并在后续海冰推动下被清除,完成下锥冰载荷的周期性加载与卸载过程。如图 10 所示,由于平整冰与上锥持续作用时,堆积海冰未能及时清除并对后续平整冰产生运动约束,相较于下锥体,后续冰力不能快速释放,从而导致上锥冰载荷高于下锥。

图 11 给出了风机基础结构位移响应曲线,其中上锥与下锥位移响应表现出相似的振动模式。这里截取 t = 25 ~ 45 s 时的风机振动状态下的位移响应,上锥振动的位移平均幅值 A_{up} = 28.43 mm,下锥振动的位移平均幅值 A_{down} = 22.92 mm。此外,不难发现

上锥仅有少部分位移小于 0,而下锥有较多时刻出现小于 0 的位移。这是由于结构运动到最大位移处冰力最大,最大冰力作用结束后冰力快速释放,达到最小值,完成一个冰力周期,结构迅速回弹。同时,由于上锥最低冰载荷远高于下锥,使得结构位移恢复困难,难以回弹至运动周期的初始点,但对于下锥,最大冰载荷作用结束后冰力迅速释放接近于 0,结构相对容易回弹经过初始点。但无论如何,海冰作用于上锥时的振动幅值要大于下锥,这与上锥结构冰载荷较大是一致的。

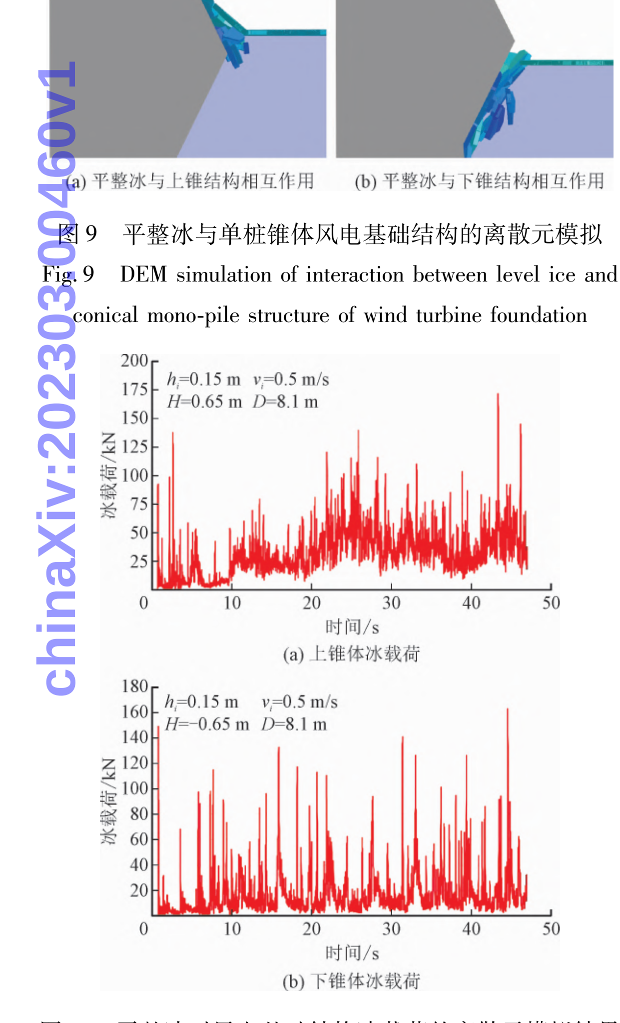


图 9 平整冰与单桩锥体风电基础结构的离散元模拟

Fig. 9 DEM simulation of interaction between level ice and conical mono-pile structure of wind turbine foundation

图 10 平整冰对风电基础结构冰载荷的离散元模拟结果

Fig. 10 Ice loads on wind turbine foundation structure simulated with DEM of level ice

为分析锥径对风电基础结构冰载荷及位移响应的影响,选取水位 H 分别为 ±2.65 m、±1.95 m、±1.30 m和 ±0.65 m 进行海冰与锥体结构的离散元分析,其所对应的锥径 D 为 6.15 m、6.8 m、7.45 m 和 8.1 m。由于冰载荷时程的随机性特点,本文选取结构冰载荷峰值的均值进行对比,如图 12 所示。结果表明,相同锥径下上锥冰载荷明显大于下锥体。在较大锥径处,由于海冰作用位置处的锥体曲率较小,易引发海冰大面积拉伸弯曲破碎,使得碎冰堆积体积增加;而在较小锥径处,由于破碎海冰较少,海冰作用位置处的锥体表面曲率较大,摩擦力不足,破碎海冰易被清除,最终导致结构冰载荷随锥径的减小而减小[9,31]。

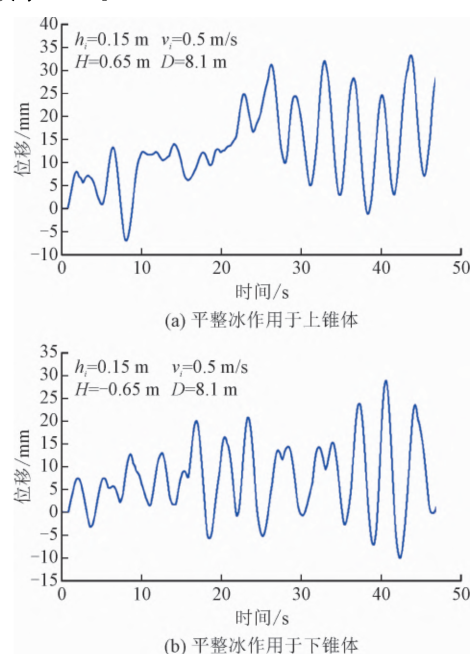


图 11 平整冰作用下风电基础结构的位移响应

Fig. 11 Displacement response of wind turbine foundation structure under action of level ice

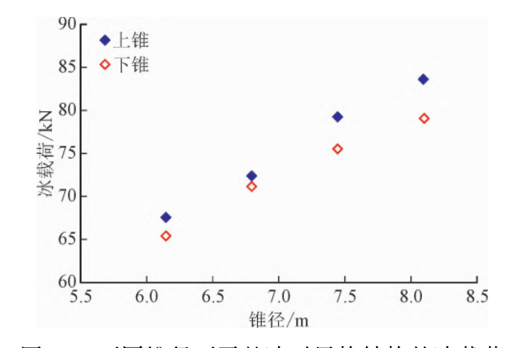


图 12 不同锥径下平整冰对风构结构的冰载荷

Fig. 12 Ice loads of level ice on conical structure of wind turbine under various cone diameters

图 13 给出了平整冰作用下锥体风电基础结构的位移响应随锥径的变化。可以发现,无论海冰作用于上锥还是下锥,风机结构的位移响应均随锥径的增加而增大,且作用于上锥时的振动位移要大于下锥,其与结构冰载荷的变化规律相似。

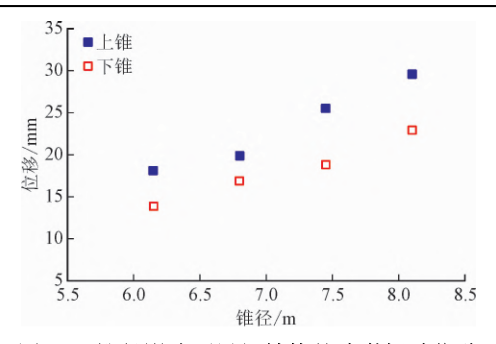


图 13　锥径影响下风机结构的冰激振动位移

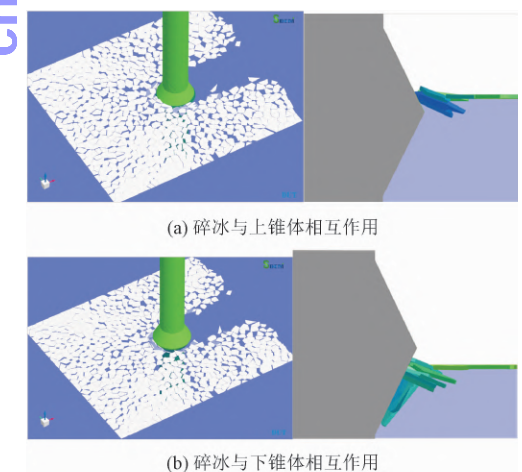
Fig. 13　The ice-induced displacements of structure vibration of wind turbine under influence of cone diameter

3　碎冰区锥体风电结构冰载荷的离散元分析及主要影响因素分析

在碎冰区,碎冰同样会对风电的振动响应与作业安全产生影响。为研究碎冰对锥体结构冰载荷的分布特性,对不同密集度下的碎冰区进行离散元构造,计算分析碎冰作用于不同锥体部位处的结构冰载荷与结构位移响应的变化规律。

3.1　碎冰区锥体风电结构冰载荷的离散元模拟

取海冰密集度 $C=80\%$,碎冰平均尺寸 $A=2\ \mathrm{m}^2$。考虑海冰作用于上锥体和下锥体情况,取水位高度 $H=\pm0.65$ m,其所对应的水线处锥径 $D=8.1$ m。采用扩展多面体离散元方法对碎冰与上锥和下锥结构的相互作用进行了数值分析,如图 14 所示,计算冰载荷变化时程如图 15 所示。碎冰作用下风机结构的振动响应如图 16 所示。

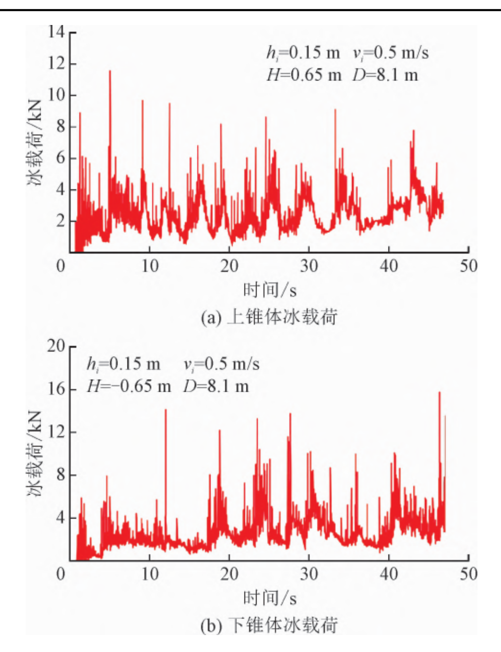


(a) 碎冰与上锥体相互作用

(b) 碎冰与下锥体相互作用

图 14　碎冰与单桩锥体风电基础结构相互作用的离散元模拟

Fig. 14　Discrete element simulation of interactions between broken ice floes and conical mono-pile structure of wind turbine foundation

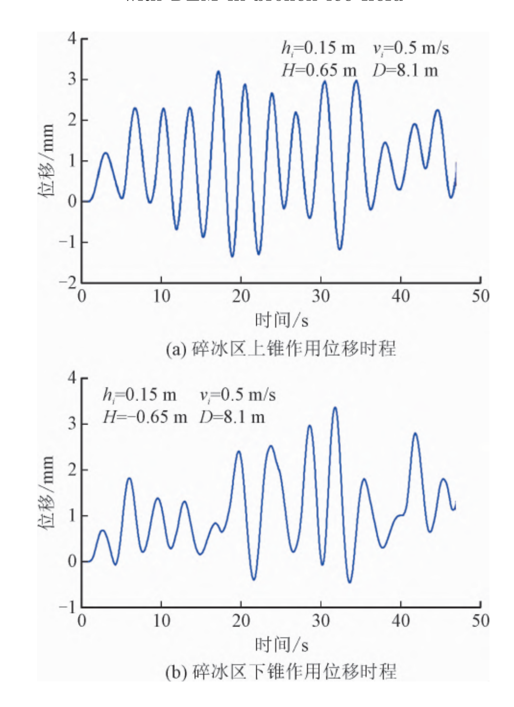


(a) 上锥体冰载荷

(b) 下锥体冰载荷

图 15　碎冰对风电基础结构冰载荷的离散元模拟

Fig. 15　Ice loads on wind turbine structure simulated with DEM in broken ice field



(a) 碎冰区上锥作用位移时程

(b) 碎冰区下锥作用位移时程

图 16　碎冰作用下风电基础结构的位移响应

Fig. 16　Displacement response of wind turbine foundation structure under action of broken ice floes

碎冰区结构冰载荷具有与平整冰作用下冰载荷类似的随机性特征,但冰载荷要明显低于平整冰;在碎冰区,上锥体冰载荷峰值的均值为 $F_{\mathrm{up}}=4.6$ kN,而下锥体上的冰载荷 $F_{\mathrm{down}}=5.6$ kN,明显低于平整冰作用下的 $F_{\mathrm{up}}=83.5$ kN 和 $F_{\mathrm{down}}=79.1$ kN;碎冰作用于上锥体时结构振动幅值的平均值 $A_{\mathrm{up}}=$

2.68 mm，而作用于下锥体上的平均值 A_{down} =2.82 mm，显著低于平整冰作用下的 A_{up} =28.43 mm 和 A_{down} = 22.92 mm。此外，还可以发现，在碎冰区作用于上锥体上的冰载荷和结构振动响应均低于下锥体，与平整冰区的情况正好相反。这主要是由于平整冰与锥体作用时会发生断裂，上锥和下锥上破碎冰产生约束条件的不同导致了上锥体的冰载荷要大于下锥体。然而对于碎冰区，海冰不会发生断裂现象，碎冰块与上锥作用时，海冰在后续不连续碎冰的作用下难以向上攀爬而在海水拖曳力作用下更容易扩散开来，导致结构冰力较小；碎冰块与下锥作用时碎冰下潜，相较于上锥，受浮力、拖曳力的影响，增加了碎冰与下锥的连续接触作用，其主要表现在卸载冰力较上锥释放缓慢，进而增加了下锥上的冰力。因此，碎冰的上锥冰力要小于下锥冰力。

3.2 碎冰区锥径及海冰密集度对风电结构冰载荷的影响

为分析碎冰区锥径对风电基础结构冰载荷及位移响应影响，分别选取水位 H 为 ±2.60 m、±2.17 m、±1.95 m、±1.52 m、±1.30 m、±0.87 m 和 ±0.65 m 时进行海冰与锥体结构的离散元分析，其对应锥径 D 为 6.15 m、6.5 m、6.8 m、7.1 m、7.45 m、7.8 m 和 8.1 m。图 17 给出了碎冰区冰载荷峰值的均值随锥径的变化情况。图 18 给出了碎冰区锥体风电基础结构位移响应随锥径的变化情况。

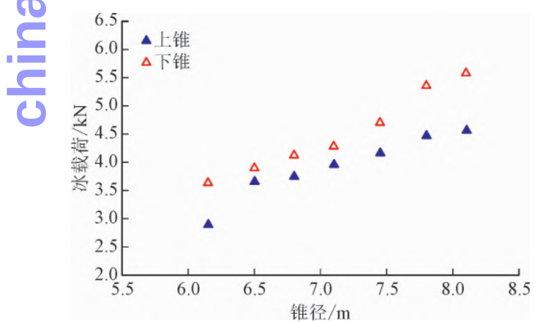


图 17 碎冰区锥径对结构冰载荷的影响

Fig. 17 Influence of cone diameter on ice load in the broken ice field

由图 17 ~ 图 18 可以看出：冰载荷随着锥径的增加而增大，下锥冰载荷大于上锥结构。这是因为碎冰与上锥体相互作用时，碎冰块未能在上锥面发生爬升而沿锥径四周扩散开来，如图 14(a) 所示；当碎冰与下锥体相互作用时，碎冰块在下锥面的阻碍作用下发生下潜，并在浮力与重力的共同影响下使其与下锥面持续接触作用，导致冰力增加，如图 14(b) 所示。因此，碎冰对下锥体的冰载荷要高于上锥。类似于冰载荷变化规律，碎冰作用下锥结构位移响应要大于上锥，但由于基础结构的运动刚度较大，导致上下锥运动位移响应的差异较小。

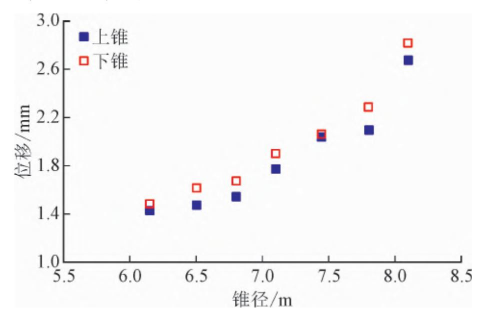


图 18 碎冰区锥径对结构振动位移的影响

Fig. 18 Influence of cone diameter on vibration displacement of structure in the broken ice field

为研究海冰密集度对上锥风电结构冰载荷的影响，应用离散元方法模拟不同海冰密集度 C 为 60%、65%、70%、75%、80%、85% 和 90% 时的冰载荷，计算结果如图 19 所示。从中可以看出，随着海冰密集度的提高，结构冰载荷增加显著。这是因为冰块在较低密集度下与结构相互作用时缺乏有效约束，从而更容易从锥体四周扩散，不能与锥体结构发生连续作用，从而降低了结构冰载荷。随着海冰密集度的增加，冰块间的相互约束不断增大，从而也增加了结构冰载荷。

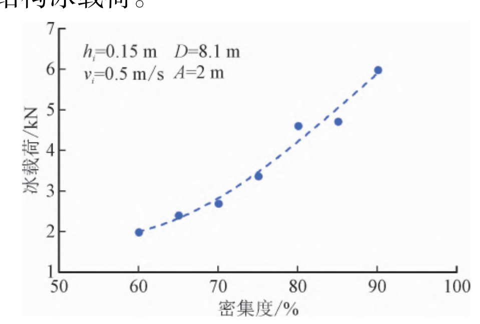


图 19 海冰密集度对冰载荷的影响

Fig. 19 Influence of ice concentration on ice load

4 平整冰和碎冰区单桩锥体风电基础结构冰载荷的对比分析

综合以上离散元模拟计算结果，海冰对风电基础结构在不同锥径下的冰载荷和结构振动响应存在差异。图 20 给出了离散元模拟的平整冰和碎冰区上下锥体结构冰载荷情况，其中碎冰密集度 C = 80%，平均尺寸 A = 2 m^2。不难看出，冰载荷均随锥径的增加而增加。平整冰对上锥结构冰载荷要明显

大于对下锥,而碎冰对上锥结构冰载荷则要低于下锥。以上现象产生的原因在上文进行了讨论说明。从冰载荷的幅值上看,以上算例中的平整冰对锥体结构的冰载荷是碎冰区的 10 倍左右。当然,浮冰块的大小、密集度等参数对冰载荷的影响非常显著。因此,平整冰对锥体结构的冰载荷要远远大于碎冰区,其主要受海冰强度的影响。为此,在对冰区风电基础的结构设计和安全运行,则需要更多地考虑平整冰的影响。

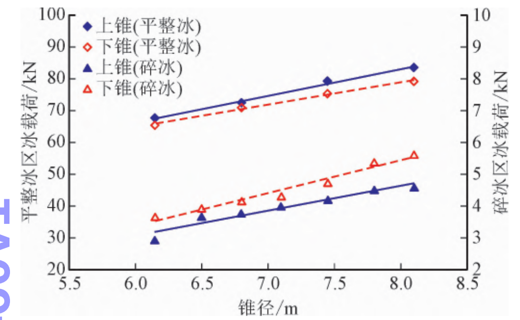


图 20　不同锥径下平整冰和碎冰对锥体结构的冰载荷

Fig. 20　Ice loads of conical structure of level ice and broken ice floes under various cone diameters

为分析在不同锥径条件下海冰对锥体风电基础结构振动响应的影响,对两种冰况作用下的结构位移响应进行对比分析,如图 21 所示。可以发现,在不同冰况条件下,平整冰区结构位移幅值响应明显高于碎冰区;而在相同冰况条件下,结构位移随锥径的增加而增大。以上变化规律与结构冰载荷响应规律相一致。

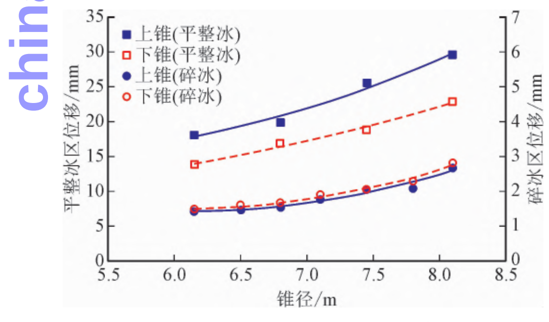


图 21　不同锥径下平整冰和碎冰作用下锥体结构的振动位移

Fig. 21　Vibration displacements of conical structure of level ice and broken ice under various cone diameters

5　结　论

本文应用具有黏结-破碎准则的扩展多面体离散元方法计算分析了单桩锥体风电基础结构分别与平整冰和碎冰的相互作用过程,并通过与 IEC 规范和 ISO 标准对计算的冰载荷进行了对比验证。采用离散元方法分析了平整冰与碎冰对锥体不同位置处的冰载荷和冰激结构响应,得到以下结论。

1)冰载荷随作用锥径的增加而增大,平整冰对锥体结构的冰载荷要明显大于碎冰。

2)平整冰对上锥结构的冰载荷要明显高于下锥,而碎冰对上锥作用冰载荷要低于下锥。

3)扩展多面体离散元方法可有效模拟海冰对单桩锥体风电结构的相互作用过程,准确计算分析冰载荷的变化规律,可为冰区锥体风电结构的抗冰设计提供有益参考。

参考文献

[1]　武海斌,黄焱,李伟. 大直径单桩风机基础冰荷载模型试验研究[J]. 海洋工程,2018,36(2):83-91. (WU Haibin, HUANG Yan, LI Wei. Experimental study on the ice load of large-diameter monopile wind turbine foundations[J]. The ocean engineering,2018,36(2):83-91(in Chinese)).

[2]　黄焱,马玉贤,罗金平,等. 渤海海域单柱三桩式海上风电结构冰激振动分析[J]. 海洋工程,2016,34(5):1-10. (HUANG Yan, MA Yuxian, LUO Jinping, et al. Analyses on ice induced vibrations of a tripod piled offshore wind turbine structure in Bohai Sea[J]. The ocean engineering,2016,34(5):1-10(in Chinese)).

[3]　狄少丞,季顺迎. 海冰与自升式海洋平台相互作用 GPU 离散元模拟[J]. 力学学报,2014,46(4):561-571. (DI Shaocheng, JI Shunying. Gpu-based discrete element modelling of interaction between sea ice and jack-up platform structure[J]. Chinese journal of theoretical and applied mechanics, 2014, 46 (4): 561-571 (in Chinese)).

[4]　陈立. 海上风电单桩基础抗冰锥结构设计[J]. 水力发电,2018,44(9):93-96. (CHEN Li. Ice cone design for the monopile foundation of offshore wind turbine [J]. Water power, 2018, 44(9):93-96(in Chinese)).

[5]　王帅飞,张大勇,王国军,等. 冰致海上风电基础结构稳态振动分析[J]. 船海工程,2019,48(6):91-95. (WANG Shuaifei, ZHANG Dayong, WANG Guojun, et al. Analysis of ice-induced steady-state vibration for offshore wind turbine foundation[J]. Ship & ocean engineering,2019,48(6):91-95(in Chinese)).

[6]　王宾,李红涛,刘嵩,等. 海上风电单桩式支撑结构冰激振动及参数敏感性分析[J]. 海洋工程,2020,38(3):94-101. (WANG Bin, LI Hongtao, LIU Song, et al. Ice-induced vibration and parameter sensitivity analysis for a monopile supported offshore wind turbine [J]. The ocean engineering, 2020, 38 (3): 94-101 (in Chinese)).

[7]　HUANG Y, SHI Q Z, SONG A. Model test study of the interaction between ice and a compliant vertical narrow structure[J]. Cold regions science and technology,2007,49(2):151-160.

[8]　许子非,叶柯华,李春,等. 海上风力机锥体结构抗冰性能分析[J]. 动力工程学报,2018,38(9):740-746. (XU Zifei, YE Kehua, LI Chun, et al. Analysis on anti-ice performance of offshore

wind turbines with ice breaking cone[J]. Journal of Chinese society of power engineering,2018,38(9):740-746(in Chinese)).

[9] 龙雪,刘社文,季顺迎. 水位变化对正倒锥体冰载荷影响的离散元分析[J]. 力学学报,2019,51(1):74-84.(LONG Xue,LIU Shewen, JI Shunying. Influence of water level on ice load on upward-downward conical structure based on Dem analysis[J]. Chinese journal of theoretical and applied mechanics, 2019, 51 (1):74-84(in Chinese)).

[10] TIAN Y F,HUANG Y. The dynamic ice loads on conical structures [J]. Ocean engineering,2013,59:37-46.

[11] SUN S S,SHEN H H. Simulation of pancake ice load on a circular cylinder in a wave and current field[J]. Cold regions science and technology,2012,78:31-39.

[12] LAU M, LAWRENCE K P, ROTHENBURG L. Discrete element analysis of ice loads on ships and structures[J]. Ships and offshore structures,2011,6(3):211-221.

[13] 刘璐,尹振宇,季顺迎. 船舶与海洋平台结构冰载荷的高性能扩展多面体离散元方法[J]. 力学学报,2019,51(6):1720-1739.(LIU Lu,YIN Zhenyu,JI Shunying. High-performance dilated polyhedral based Dem for ice loads on ship and offshore platform structures[J]. Chinese journal of theoretical and applied mechanics,2019,51(6):1720-1739(in Chinese)).

[14] 李晔. 锥体海洋平台结构冰荷载的离散单元分析[J]. 船舶力学,2017,21(10):1254-1262.(LI Ye. Analysis of ice load on conical structure with discrete element model[J]. Journal of ship mechanics,2017,21(10):1254-1262(in Chinese)).

[15] 刘璐,季顺迎. 基于扩展多面体包络函数的快速接触搜索算法[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学,2019,49(6):13-27.(LIU Lu,JI Shunying. A fast detection algorithm based on the envelope function of dilated polyhedron [J]. Scientia sinica: physica, mechanica & astronomica,2019,49(6):13-27(in Chinese)).

[16] 李勇俊,季顺迎. 基于球形颗粒几何排列的离散元试样高效生成方法[J]. 应用力学学报,2020,37(2):469-476.(LI Yongjun, JI Shunying. Construction approach of DEM samples with high efficiency based on geometrical packing of spherical particles[J]. Chinese journal of applied mechanics,2020,37(2):469-476(in Chinese)).

[17] BARKI H, DENIS F, DUPONT F. Contributing vertices-based Minkowski sum computation of convex polyhedra[J]. Computer-aided design,2009,41(7):525-538.

[18] LEE Y,BEHAR E,LIEN J M,et al. Continuous penetration depth computation for rigid models using dynamic Minkowski sums[J]. Computer-aided design,2016,78:14-25.

[19] SOTOMAYOR OE, TIPPUR H V. Role of cell regularity and relative density on elasto-plastic compression response of random honeycombs generated using Voronoi diagrams[J]. International journal of solids and structures,2014,51(21/22):3776-3786.

[20] LIU S D,ZHOU Z Y,ZOU R P,et al. Flow characteristics and discharge rate of ellipsoidal particles in a flat bottom hopper[J]. Powder technology,2014,253:70-79.

[21] ZHOU Y H. A theoretical model of collision between soft-spheres with Hertz elastic loading and nonlinear plastic unloading[J]. Theoretical and applied mechanics letters,2011,1(4):041006.

[22] RAMÍREZ R,PÖSCHEL T,BRILLIANTOV N V,et al. Coefficient of restitution of colliding viscoelastic spheres[J]. Physical review. E,Statistical physics,plasmas,fluids,and related interdisciplinary topics,1999,60(4):4465-4472.

[23] MA G,ZHOU W,CHANG X L,et al. A hybrid approach for modeling of breakable granular materials using combined finite-discrete element method[J]. Granular matter,2016,18(1):1-17.

[24] CAMANHO P P,DAVILA C G,DE MOURA M F. Numerical simulation of mixed-mode progressive delamination in composite materials[J]. Journal of composite materials,2003,37(16):1415-1438.

[25] BENZEGGAGH M L,KENANE M. Measurement of mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites with mixed-mode bending apparatus[J]. Composites science and technology,1996,56(4):439-449.

[26] LIU L,JI S Y. Bond and fracture model in dilated polyhedral DEM and its application to simulate breakage of brittle materials[J]. Granular matter,2019,21(3):1-16.

[27] LIU L,JI S Y. Ice load on floating structure simulated with dilated polyhedral discrete element method in broken ice field[J]. Applied ocean research,2018,75:53-65.

[28] QU Y,YUE Q J,BI X J,et al. A random ice force model for narrow conical structures[J]. Cold regions science and technology,2006, 45(3):148-157.

[29] International Electrotechnical Commission. Wind turbines (part 3): Design requirements for offshore wind turbines:IEC 61400-3[S]. Geneva:International Electrotechnical Commission,2009.

[30] European Commission for Standardization. Petroleum and natural gas industries-Arctic offshore structures: ISO 19906: 2010 [S]. Brussels:European Commission for Standardization,2010.

[31] LONG X,LIU S W,JI S Y. Breaking characteristics of ice cover and dynamic ice load on upward-downward conical structure based on DEM simulations[J]. Computational particle mechanics,2021,8 (2):297-313.

(编辑　黄崇亚)